

# 掺 Be 分子束外延 GaAs 的喇曼光谱

蒋最敏 左 健 修立松 许存义

(中国科技大学结构成份分析中心, 安徽, 合肥)

庄蔚华 梁基本

(中国科学院半导体研究所, 北京)

**摘要**——利用喇曼光谱研究了掺 Be 分子束外延 P 型 GaAs 中晶格振动的纵光学声子 LO 与空穴等离子体激元的耦合。观测了耦合模  $L_+$  与  $L_-$  的喇曼光谱及其谱峰强度和位置随不同空穴浓度的变化, 并对谱图进行了分析和讨论。

**关键词**——分子束外延, P 型 GaAs, 喇曼光谱。

## 1. 引 言

利用喇曼光谱对 N 型 GaAs 中晶格振动的 LO 声子与等离子体激元的耦合模已经进行了广泛的研究<sup>[1~5]</sup>, 然而人们对 P 型 GaAs 中空穴等离子体激元与 LO 模的耦合问题却研究得很少。主要原因是由于 GaAs 价带顶的态密度远大于导带底态密度, 要使载流子发生简并, P 型样品比 N 型样品需要更重的掺杂, 这给样品制备带来困难。Cardona 等人<sup>[6]</sup>和 Yuasa 等人<sup>[7]</sup>曾分别对掺 Zn 和 Be 的 P 型 GaAs 材料的喇曼光谱进行了研究, 但他们的实验结果差异很大, 对结果的分析也有较大分歧。Cardona 等人在接近 LO 和 TO 处观测到两个峰, 并把这两个峰分别指认为长波矢的 LO 声子与自由空穴等离子体激元的耦合模和禁戒的 TO 声子模, 认为长波矢耦合模的出现和 TO 模的激活是由于高浓度电离杂质散射导致波矢不守恒和选择定则破坏引起的。而 Yuasa 等人的实验却证明, 在重掺 Be 分子束外延样品中, 波矢守恒和选择定则依然成立, 他们在 LO 高频边观测到一个肩峰, 在稍低于 TO 频率外观测到另一个峰, 他们把这两个峰分别指认为自由空穴等离子体激元与 LO 声子的耦合模  $L_+$  和  $L_-$ , 并认为实验结果不同可能是由于 Cardona 等人的体 GaAs 材料在高掺 Zn 时缺陷较多引起的。此外, 在 Yuasa 等人的工作中, 由于样品的掺杂浓度的限制, 只在一个样品中明显地观测到  $L_+$  峰, 在另一个样品中观测到  $L_-$  峰, 因此, 从他们的实验结果难以看出  $L_+$  和  $L_-$  模强度及位置随不同载流子浓度的变化行为。本工作研究了载流子浓度为  $1.8 \times 10^{18} \sim 9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  范围的一系列掺 Be 分子束外延 P 型 GaAs 样品的喇曼光谱,

观测了  $L_+$ 、 $L_-$  模的强度和位置随不同载流子浓度的变化行为, 并对谱图结果进行了分析和讨论. 由于 Be 是分子束外延 P 型 GaAs 材料的主要掺杂剂, 该材料在固体激光器和高速微波器件的制备中有重要应用, 因此, 探索用喇曼光谱对该材料微区薄层中载流子浓度等参数进行无损检测是非常有意义的.

## 2. 实 验

实验所用样品是在 (100) 面的 GaAs 衬底上用分子束外延方法生长的, 外延层厚度为  $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$ . 用霍尔效应法测量了样品的载流子浓度. 喇曼光谱是用 SPEX-1403 型激光喇曼光谱仪采用背散射方式在室温下测量的. 利用氩离子激光器的  $514.5 \text{ nm}$  线作为激发光源, 功率为  $300 \text{ mW}$ . 记录了  $200 \sim 350 \text{ cm}^{-1}$  光谱范围的喇曼光谱.

## 3. 实验结果和讨论

不同载流子浓度样品的喇曼光谱以及我们对谱峰的指认如图 1 所示. 喇曼光的谱测量

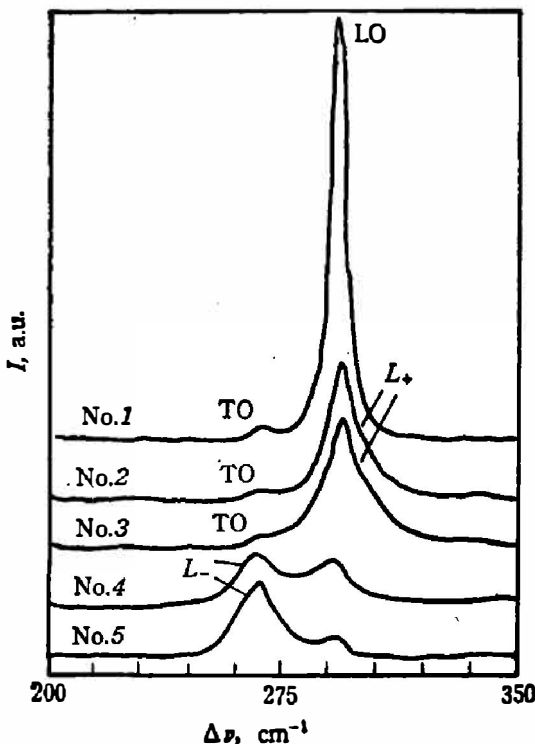


图 1 不同载流子浓度样品的喇曼光谱  
(载流子浓度分别为: No. 1— $p=1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , No. 2— $p=1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , No. 3— $p=3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , No. 4— $p=1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , No. 5— $p=9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )

Fig. 1 Raman spectra from P-type GaAs layers with different hole concentrations

是在相同实验条件下进行的, 因此可以直接比较谱峰的强度和位置. 为了能更清楚地看出载流子浓度变化时谱峰形状和位置的变化, 图 2 给出 No. 1~3 样品经强度归一化处理后的谱图, 图 3 示出 No. 2 和 No. 3 样品喇曼光谱的分解情况.

由于 GaAs 外延层表面总是存在着表面耗尽层, 当空穴浓度为  $1 \times 10^{16} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  时, 耗尽层厚度在  $300 \sim 10 \text{ nm}$  范围变化, 而波长为  $514.5 \text{ nm}$  的激光在 GaAs 中的透射深度约为  $100 \text{ nm}$ , 因此实验测得的喇曼光谱实际上是表面耗尽层和体内散射信号叠加的结果. 由图 1 可见, 所有样品都出现 LO 振动模, 其强度随载流子浓度增加而减小, 这正是由于载流子浓度增大使表面耗尽层厚度减小引起的. 对掺杂最轻的 No. 1 样品, 由于耗尽层太厚, 实验中只检测到耗尽层的晶格振动模 LO ( $292 \text{ cm}^{-1}$  处的对称强峰) 和 TO ( $269 \text{ cm}^{-1}$  处的弱峰).

随着载流子浓度增加, 表面耗尽层厚度减小, 在 No. 2 和 No. 3 样品的喇曼光谱中, 显示出了体内耦合模  $L_+$ . 但在 No. 2 和 No. 3 样品的载流子浓度下, 根据晶格振动的 LO 声子与等离子激元耦合模的特性<sup>[8]</sup>,  $L_-$  模具有较强的等离子体性, 因散射强度较弱而未显现. 由于  $L_+$  模与 LO 模叠加(参见图 3), 使 LO 峰变为非对称形状, 谱峰宽度(主要在 LO 峰高波数一

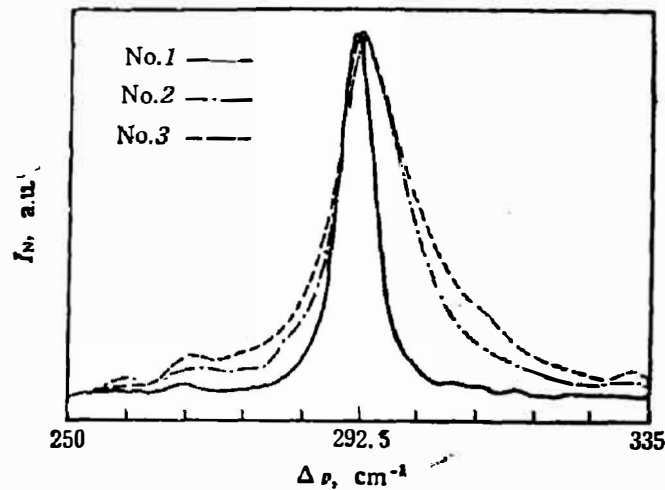


图 2 强度经过归一化处理的 No. 1~3 样品的喇曼光谱  
 Fig. 2 Raman spectra of No. 1~3 samples (Raman intensity is normalized).

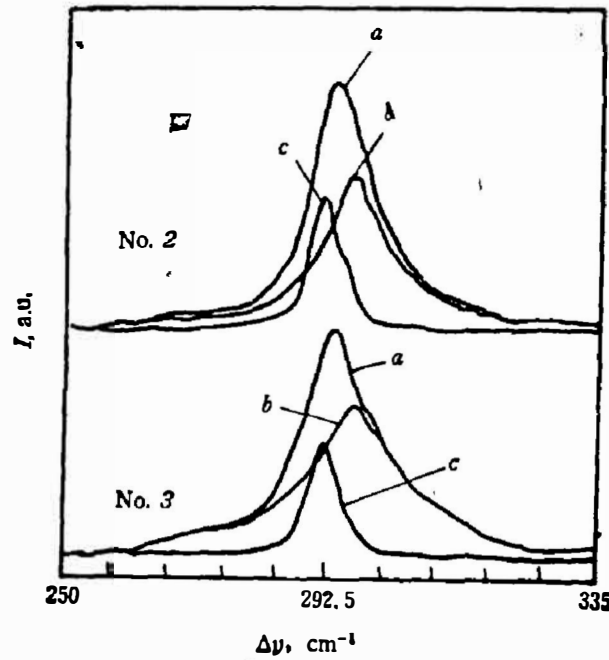


图 3 No. 2 和 No. 3 样品喇曼光谱的分解  
 (a 为实验测得的散射谱峰, b 和 c 分别为分解得到的  $L_+$  和 LO 谱峰)  
 Fig. 3 Experimental Raman spectrum (curve a) divided into two components,  $L_+$  (curve b) and LO (curve c)

边)明显增加,并且由于 No. 2 样品  $L_+$  峰( $296\text{ cm}^{-1}$ )比较强,两个峰的叠加还导致谱峰向高波数产生位移,由于浓度限制,此时位移不一定最大.(约  $1\text{ cm}^{-1}$ ). No. 3 样品的  $L_+$  模相对较弱,而且波数位置比 No. 2 稍高,两峰叠加后谱峰又基本回到  $292\text{ cm}^{-1}$ ,但谱峰宽度却进一步增加(参见图 2).从 No. 2 和 No. 3 样品的喇曼光谱可以看出,随着载流子浓度增加,  $L_+$  谱峰向高波数移动同时强度减小、峰宽增大.

在更高载流子浓度( $\sim 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ )的样品中,  $L_+$  模具有较强的等离子体性,散射强度大为减小.此外,重掺杂样品中大量载流子散射中心的引入导致  $L_+$  谱峰严重宽化.根据理

论估计,在载流子浓度为  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  时,  $L_+$  谱峰宽度约为  $302 \text{ cm}^{-1}$  [7]。由于实验上很难检测到线宽如此大的弱信号,因此在 No. 4 和 No. 5 样品的喇曼光谱中便没有出现  $L_+$  峰, LO 峰也不再受  $L_+$  峰的影响而成为  $292 \text{ cm}^{-1}$  处的对称谱峰。

根据耦合模的特性可知,在高载流子浓度时,  $L_-$  模具有强声子性,散射强度大,因此在 No. 4 和 No. 5 样品的喇曼光谱中,明显地显示出  $L_-$  模,其谱峰位置分别为  $267 \text{ cm}^{-1}$  和  $267.5 \text{ cm}^{-1}$ ,随载流子浓度增加,谱峰位置向高波数移动不明显 ( $0.5 \text{ cm}^{-1}$ ),但谱峰强度显著增大,这与强声子性耦合模  $L_-$  的性质是符合的。此外,在 No. 1~3 样品中,都在 GaAs (100) 面观测到本应是非活性的 TO 模,我们认为这是由于衬底与 (100) 面略有偏离引起的,由于外延层和衬底材料的晶向一致,所以在各样品中该峰的强度基本相同,当然,在 No. 4 和 No. 5 样品的  $L_-$  谱峰中也包含这种较弱的 TO 振动模。

利用喇曼光谱研究了掺 Be 分子束外延 GaAs 中晶格振动的纵光学声子 LO 与空穴等离子体激元的耦合。除表面耗尽层的晶格振动模 LO 外,分别在载流子浓度数量级为  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  和  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的样品中观测到耦合模  $L_+$  和  $L_-$ 。实验表明载流子浓度增大时,  $L_+$  模频率升高而强度变弱,  $L_-$  模频率也升高但强度增大,这与耦合模  $L_+$ 、 $L_-$  的特性一致。

### 参 考 文 献

- [1] Mooradian A. and Wright G. B., *Phys. Rev. Lett.*, **16** (1966), 999.
- [2] Abstreiter G. et al., *Appl. Phys.*, **16** (1978), 345.
- [3] Pinczuk A. et al., *Solid State Commun.*, **21** (1977), 959.
- [4] Abstreiter G. et al., *Solid State Commun.*, **30** (1939), 703.
- [5] 韩和相、汪兆平、李国华等, *半导体学报*, **5** (1984), 5: 544.
- [6] Olego D. and Cardona M., *Phys. Rev.*, **B24** (1981), 12: 7217.
- [7] Yuasa T. and Ishii M., *Phys. Rev.*, **B35** (1987), 8: 3962.
- [8] Hayes W. and Loudon R., *Scattering of Light by Crystal*, John Wiley and Sons, Inc., 1978, P. 313.

## RAMAN SPECTRA OF Be-DOPED MBE GaAs

JIANG ZUIMIN, ZUO JIAN, XIU LISONG XU CUNYI

(Structure Research Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, China)

ZHUANG WEIHUA, LIANG JIBEN

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing, China)

### ABSTRACT

The hole plasmon-LO phonon coupling is studied by Raman spectra in Be-doped P-type GaAs with  $p=1.8 \times 10^{18} \sim 9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  grown by molecular beam epitaxy. The coupled modes  $L_+$  and  $L_-$  are detected. The Raman spectra and the dependences of the behaviors of  $L_+$  and  $L_-$  modes on hole concentrations are studied.